

南韓의 沃川褶曲帶에 분포되어 있는 堤川花崗岩體의 熱歷史

陳明植 · 金星載 · 辛性天 · 朱昇煥 · 池世定

韓國資源研究所, 地化學研究그룹, 大田直轄市 儒城區 柯亭洞 30 (305-350)

요 약: 沃川褶曲帶의 堤川花崗岩에 대하여 Rb-Sr, K-Ar 그리고 冼선트랙 등 세 가지 방법으로 다음과 같은 熱歷史를 규명하였다. 3개의 전암시료와 7개의 광물시료의 Rb과 Sr의 동위원소를 측정하여 얻은 等時線年齡은 202.7 ± 1.9 Ma이고, Sr 초생치는 0.7140였다. 12개의 광물시료를 K-Ar 및 冼선트랙법으로 연령측정한 결과 각각의 年齡保存溫度에 거의 相應하는 광물연령을 얻었다. 연령측정자료로 이 암석의 成因과 암체의 熱歷史를 해석한 결과는 다음과 같다. 靑丘花崗암은 侏羅紀초(약 203 Ma)에 地殼物質이 부분용융을 받아서 만들어진 "S-型"의 마그마가, 또는 맨틀기원의 "I-型" 마그마와 지각물질의 심한 混化작용에 의해 만들어진 마그마가 지각 심부(mesozone 또는 katazone; 약 7~9 km)에 관입하였으며, 관입체와 주변암석과의 온도차 때문에 300°C까지는 매우 빨리 냉각되었다. 侏羅紀末까지는 주위 암석들과 열적인 평형을 유지하므로써 냉각이 거의 중지되었다가, 白堊紀初부터 말까지(140~70 Ma)는 火成 활동을 隨伴한 심한 地構造運動과 활발한 噴火작용 때문에 평균 약 40~60 m/Ma의 上昇率과 약 1.4°C/Ma의 冷却率로 3~7 km 상승하였다. 백악기말부터 三紀初(70~50 Ma)까지는 평균 약 100~120 m/Ma의 상승률과 5°C/Ma의 냉각률을, 그리고 삼기초(50 Ma)부터 현재까지는 평균 약 50~60 m/Ma의 상승률과 2°C/Ma의 냉각률을 가지고 각각 상승 및 냉각된 것으로 해석된다.

핵심어: 沃川褶曲帶, 熱歷史, 堤川花崗岩, 同位元素 年齡, 年齡保存溫度

序論 및 地質概要

先캄브리아紀의 京畿陸塊와 小白山陸塊의 사이에 분포된 沃川褶曲帶의 北東部인 寧越-堤川-丹陽 一帶에는 先캄브리아紀의 堆積起源 變成岩을 基盤岩으로 하여 그 위에 古生代 캄브리아紀-오오도비스紀의 石灰質 堆積岩이 광범위하게 분포되어 있다(그림 1). 이들 古生代의 石灰質 堆積岩類는 中生代 火成活動에 수반된 地殼變動 또는 造山運動에 의하여 褶曲 및 變成作用을 받았으며, 이를 관입한 堤川花崗암체의 주변에 발달된 金屬·非金屬鑛化帶는 國內外 地質學者들의 주요 연구대상이 되어 왔다(金勇俊, 1979; Shibata *et al.*, 1983; 金作漢과 慎胤修, 1990)(표 1).

研究 地域에 분포되어 있는 金屬 및 非金屬鑛床에 대한 鑛床學的 研究結果는 多數 보고된 바 있으나, 關係 火成岩(ore-bringer) 또는 堤川花崗암의 관입 연령과 관련된 연구는 아직 시도된 바가 없다. 그러나 黃江里 鑛化帶 內에 分布된 一部 花崗암체들의 관입시기는 金玉準(1971), 徐海吉과 朱昇煥(1971), 그 외 日人 地質學者들(Shibata *et al.*, 1983) 등에 의해 發表된 바 있는데, 그 당시에는 貫入時期의

解釋을 K-Ar 黑雲母 年齡에 의존하였으므로 이의 再檢討가 요망되어 왔다. 그후 朱昇煥과 池世定(1990)에 의하여 上記 花崗암체의 Rb-Sr 全岩 및 黑雲母 年齡이 一部 보고되었으나, 이들 花崗암체를 구성하는 各 花崗岩類의 時·空間的 相互關係 및 精確한 貫入時期와 冷却史 등에 관한 자료는 아직까지 얻어진 바 없으므로, 이 地域一帶의 鑛化作用의 時期 및 關係 花崗암의 成因 규명과 地體構造 發達史를 밝히는 데에 어려운 점이 많았다.

그러므로 이번 연구에서는 현재 한국자원연구소에서 실시하고 있는 放射性 同位元素로 岩石·鑛物의 年齡을 測定하는 Rb-Sr法, K-Ar法 및 冼선트랙(fission-track: FT)法 등 세가지 방법을 함께 적용하여 綜合的인 解釋을 실시하므로써, 花崗암체의 貫入·定置 및 冷却史를 밝히고, 지금까지의 問題點을 明確히 究明하여, 韓半島 地體構造 發達史에 대한 重要한 資料를 提示하고자 한다.

岩石 記載

堤川花崗암체는 NEE-SWW 方向의 長軸을 갖는 넓이 약 200 km²의 底盤狀 岩體로서(그림 1), 이

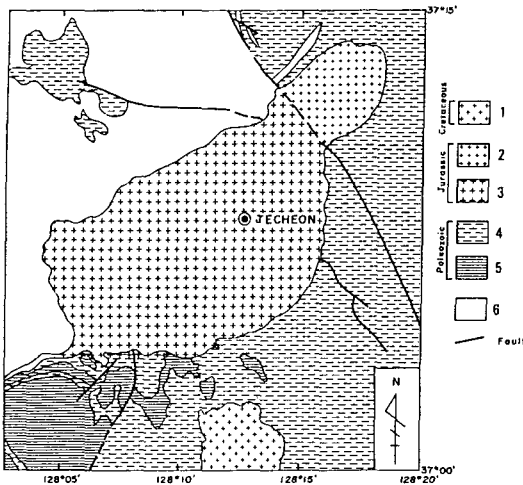


Fig. 1. Map showing the geology of the Jecheon Granite and its vicinity (after Geological and Mineral Institute of Korea, 1973). 1=medium to coarse grained biotite granite (Muamsa Granite); 2=fine to medium grained biotite granite (Songhagsan Granite); 3=Medium to coarse grained biotite granite (Jecheon Granite); 4=Joseon Supergroup; 5=Ogcheon Supergroup; 6=Precambrian gneiss and schist.

岩體의貫入時期는 오랫동안 1:1,000,000 대한지질도 (1956, 1981), 1:250,000 春川지질도 (1973), 1:50,000 堤川地質圖 (金基院 외 2인, 1967)와 김용준 (1979)은 白堊紀라고言及 또는 기재하여 왔으나, 最近 일본인 지질학자들에 의해 黑雲母의 K-Ar 同位元素 年齡 (Shibata *et al.*, 1983)이 주라기 중기 (169~179 Ma)로 밝혀짐에 따라 주라기貫入岩體로 확신하게 되었다. 그러나 K-Ar 흑운모의 연령이 주라기 중기로 나타났지만, 이 연령을 관입연령이라고는 할 수 없으므로 보다 정확한 관입연령을 구할 필요가 있게 되었다.

이 岩體의 주위에는 先캄브리아기의 花崗片麻岩과 片岩으로 構成되어 있는 朴達嶺變成岩 複合體를 基盤岩으로 하여 그 상부에 캄브리아기 오오도부스기의 石灰質 堆積岩이 不整合으로 분포되어 있다. 이번의 야외조사 결과, 최근까지 동일한 時期에 관입한 單一 岩體로 알려진 堤川 花崗암체는 이 암체의 북동쪽에 발달된 NW-SE 방향의 斷層을 중심으로, 그 서남부는 소위 堤川花崗암이라는 중립-조립질 黑雲母 花崗閃綠岩~黑雲母 花崗岩이 분포되어 있으며, 그 북동부 (松鶴山일대)에는 등립상 세립-중

Table 1. Geologic sequence of the study area.

Quaternary	Alluvium
	Unconformity
Jurassic to Cretaceous (?)	Dyke rocks
	Intrusive
Jurassic	Songhagsan Granite
	Fault
	Jecheon Granite
	Intrusive
Cambro-Ordovician	Ogcheon Supergroup
	Unconformity
	Joseon Supergroup
	Unconformity
Precambrian	Metamorphic rocks

립질 黑雲母 花崗岩인 송학산 花崗암이 분포되어 있어서 서로 구분되며 (그림 1), 이들은 斷層에 의하여 서로 접하고 있어서 그 先後관계는 확실하지 않으나, Shibata *et al.* (1983)의 K-Ar 흑운모 연령 자료가, 前者가 179±6 Ma (G-1)이고, 後者는 169±5 Ma (G-2)로 나타나서, 일반적인 암상변화와 생성 시기는 서로 반대로 나타났다. 즉 세립질이 우세한 송학산 암체가 조립질이 우세한 제천암체보다 더 오랜 것으로 나타났다면 당연한 일이나, 반대로 나타난 것으로 미루어 보아 송학산花崗암이 약간 후에 관입한 것이 아닌가 해석된다.

堤川花崗암체 (서남부 암체)의 동쪽 緣邊部는 等粒狀 中粒質 흑운모 花崗섬록암이나 서쪽 및 중앙으로 가면서 알카리장석 結晶이 점점 커지고 함량도 많아지는 경향이 뚜렷하며, 중앙부에서는 巨晶 알카리長石이 1~2.5×6~9 cm의 크기로 成長되어 있으며, 容積率이 약 20%에 達하는 경우도 있다. 서남부 암체 (화강섬록암)의 동쪽 緣邊部와 동북부 암체 (세립질 흑운모 花崗암)의 중앙부 (松鶴山一帶) 도처에貫入되어 있는 半花崗岩質 岩脈 (aplitic dyke)은 岩相이 서로 거의 類似하고, 晶洞構造가 발달되어 있다. 이 반화강암질암에 대한 암석광물 연령측정자료가 없으므로 정확한 관입시기는 알 수 없으나, 堤川花崗岩보다는 훨씬 後期에 弱線帶를 따라 岩脈狀으로 비교적 淺處에 관입한 것으로 여겨진다. 그리고 이 암체의 남부지역 금성 휘수연광상일대 (G-1, Shibata *et al.*, 1983)는 鑛化作用이 확인되며 JC-19번 시료채취지역 일대에서도 熱水變質作用이 확인되어 이 花崗암체의 定置후에 열수변질 또는 광화작용이 여러 곳에 있었음을 알 수 있다.

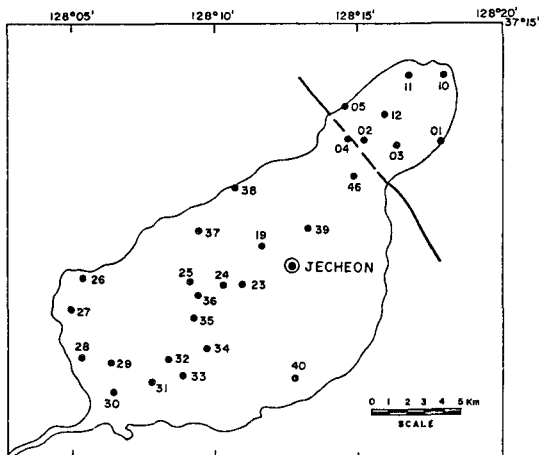


Fig. 2. The sampling sites of the age determination for the Jecheon Granite.

年齡測定試料의 鑛物分離 및 試料調製

採取된 試料는 當 研究所가 수행하고 있는 Rb-Sr법, K-Ar법 그리고 冢선트랙법 등의 연령측정 장비를 사용하여 年齡을 測定하였다. 採取된 모든 試料는 粉碎, 粉碎, 광물분리로부터 Rb, Sr 등의 동위원소의 分離 및 정량에 이르기까지 세심한 주의와 잘 洗滌된 器具를 使用, 이미 확립된 試料調製方法 (朱昇煥, 1983)에 따라 처리 되었다.

Rb-Sr 연령측정시에는 實驗室의 化學處理 系統을 再檢하고, 測定結果의 精密도를 확보하기 위하여 NBS-607 (K-feldspar), U.S.G.S의 GSP-1 및 BCR의 標準試料를 사용하여 확인하였다. 質量分析器의 同位體 測定比에 대한 精密도를 유지하기 위하여 同位體의 標準物質으로는 NBS 987 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.71014$) 및 NBS-607 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=1.2004$)를 使用하였다. 스파이크는 NBS-987 및 ORNL (Oak Ridge National Laboratory, U.S.A)를 使用하였다. 質量分析器 Th-5 를 이용, 同位元素 稀釋法으로 Sr과 Rb의 동위원소를 分析하였다. 이온計數에 使用된 計數管은 Faraday Cup을, 出力자료는 디지털볼트미터 (digital voltmeter; Prema 5040)로 處理하여, 자체개발한 전산프로그램을 사용하여 출력시켰으며, 測定誤差는 0.1% 미만으로 유지하였다. 等時線의 파라미터는 最小자승법 (Wendt, 1976)으로 계산하였다.

K-Ar 연령측정시, K의 정량은 IL-551 Atomic Absorption Spectrometer로, 알콘동위원체비의 측정은

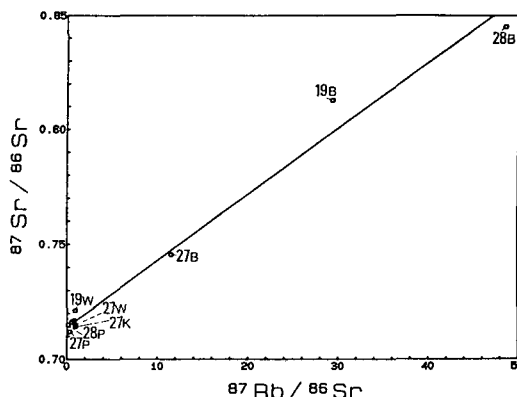


Fig. 3. A Rb-Sr isochron for the Jecheon granite obtained from whole rock and minerals (plagioclase, microcline and biotite). An isochron age of 202.7 ± 1.9 Ma is given with an initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of 0.7140 ± 0.0002 . 19, 27 and 28 denote sample numbers JC-19, JC-27 and JC-28, respectively. W=Whole rock; B= Biotite; K=K-feldspar; P=Plagioclase.

Nuclide사 제품 SGA 6"-60° Mass Spectrometer로 당연구소에서 시행하고 있는 방법 (김성재, 1987)에 따라 실시하였으며, K의 분석, $^{40}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$ 및 $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$ 는 각각 1~2%, 0.5%, 2%의 정확도로 정량되었으며, 스파이크검정 (spike calibration)은 1% 내외였다.

^{87}Rb 과 ^{40}K 의 붕괴율과 同位元素 稀釋法에 적용한 物理常數는 모두 새 常數(Steiger & Jüger, 1977)를 使用하였다.

冢선트랙 연령측정은 한국자원연구소에서 실시중 (신성천, 1987; 진명식과 신성천, 1987)인 방법으로 측정하였다.

年齡測定 結果

堤川 화강암체의 貫入時期를 규명하기 위하여, 각섬석-흑운모 화강암의 全岩시료 (3개) (그림 2), 알카리장석 (2개), 사장석 (2개) 그리고 흑운모 (3개) 등 모두 10개의 시료에 대하여 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 비 및 初生 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비를 구하였다. 즉 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 및 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 값의 범위는 全岩시료의 경우에는 각각 0.58~1.02 및 0.7146~0.7215, 사장석은 0.17~0.35 및 0.7122~0.7151, 알카리장석은 0.83~0.92 및 0.7152~0.7171이며, 흑운모는 11.60~48.60 및 0.7457~0.8452이다 (표 2).

Table 2. Rb-Sr isotopic data of the whole rock and minerals from the Jecheon Granite in the Ogcheon Fold Belt, South Korea.

Sample No.	Sheet Name	Nat'l Grid (x/y)	Material dated	⁸⁶ Sr (ppm)	⁸⁷ Rb (ppm)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr
JC-19	Jecheon	128.3/405.5	Whole rock	32.21	30.20	0.926	0.7215
				8	10	5	9
			Biotite	3.42	101.90	29.40	0.8129
				1	1.30	40	8
JC-27	Jecheon	117.6/402.0	Whole rock	34.22	34.90	1.008	0.7146
				9	10	4	7
			Plagioclase	69.10	24.40	0.349	0.7122
				70	10	4	6
			Biotite	11.10	130.30	11.60	0.7457
				2	70	7	7
			K-feldspar	64.40	59.70	0.92	0.7152
				1.50	30	2	10
JC-28	Jecheon	118.4/399.7	Whole rock	40.80	24.02	0.581	0.7165
				30	7	4	8
			Plagioclase	73.50	12.55	0.169	0.7151
				1.60	4	4	7
			Biotite	3.74	184.10	48.60	0.8452
				1	1.90	50	6
			K-feldspar	74.30	62.60	0.83	0.7171
				2.10	30	2	4

*These isotopic data make an isochron of 202.7 ± 1.9 Ma with an initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of 0.7140 ± 0.0002 . MSWD = 5.11.

Table 3. K-Ar age data for the rock forming minerals from the Jecheon Granite in the Ogcheon Fold Belt, South Korea.

Sample No.	Mineral	K (%)	⁴⁰ Ar _{rad} ($\times 10^{-9}$ mol/g)	⁴⁰ Ar _{rad} (%)	Age $\pm \sigma$ (Ma)
JC-19	Biotite	5.12	1.647	96.95	176.5 \pm 2.5
JC-27	Plagioclase	1.38	0.493	84.78	195.0 \pm 1.3
	Biotite	6.76	2.305	96.69	186.6 \pm 5.4
JC-28	Microcline	9.55	1.754	86.40	102.9 \pm 4.6
	Plagioclase	1.44	0.547	76.74	206.8 \pm 1.6
	Biotite	5.45	1.862	95.28	187.0 \pm 9.2
	Microcline	9.47	2.161	92.42	127.0 \pm 5.5

이들 값으로부터 얻어진 Rb-Sr 等時線 (isochron) 연령은 202.7 ± 1.9 Ma로 나타났고 (그림 3), Sr 생성치 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)는 0.7140 ± 0.0002 임이 확인되었다.

이 岩體의 冷卻史 또는 熱歷史를 究明하기 위하여 斜長石, 黑雲母, 알카리 長石에 대한 K-Ar법 (김성재, 1987)으로 연령을 측정된 결과, 사장석은 206~195 Ma, 흑운모는 187~177 Ma, 그리고 微斜長石은 103~127 Ma의 연령을 각각 보여주며 (표 3), 시료 채취 위치가 서로 가까운 두개 시료 (JC-27과 JC-28)

의 흑운모연령은 서로 매우 유사한 연령을 제시한다.

또 螢石트랙법 (辛性天, 1987; 陳明植과 辛性天, 1987)으로 측정된 이들 시료의 스피린연령은 139~143 Ma, 저콘연령은 64 Ma, 그리고 인회석의 연령은 각각 44~54 Ma를 나타냈다 (표 4).

考察 및 討議

앞서 기술한 바와 같이, 堤川 화강암체의 관입시

Table 4. Fission-track age data of sphene, zircon and apatite from the Jecheon Granite, in the Ogcheon Fold Belt, South Korea.

Sample No.	Mineral	ps(Ns) ($\times 10^6 \text{ cm}^{-2}$)	pi(Ni) ($\times 10^6 \text{ cm}^{-2}$)	pd(Nd) ($\times 10^6 \text{ cm}^{-2}$)	n	γ	P(χ^2) (ps/pi)	FT Age ($\pm 1\sigma$, Ma)
JC-27	Sphene	7.412(866)	6.590(770)	2.306(3,954)	6	0.4342	85	142.8 \pm 8.2
	Apatite	0.527(450)	3.498(2,988)	5.300(5,113)	14	0.7958	(0.151)	44.2 \pm 2.6
JC-28	Sphene	7.266(919)	6.602(835)	2.287(3,922)	5	0.7415	65	138.6 \pm 7.8
	Zircon	4.250(82)	5.235(101)	1.422(4,573)	2	1.0000	(0.812)	63.8 \pm 9.7
	Apatite	0.494(624)	2.670(3,374)	5.301(5,114)	12	0.5926	75	54.2 \pm 2.8

*Ages were calculated with a zeta constant for the standard dosimeter glass CN1, viz. $\zeta_{\text{CN1}} = 110.9 \pm 2.7$ (2σ) (Shin and Nishimura, 1991) by the external detector method (geometry factor=0.5).

*ps=spontaneous track density in mineral; pi=induced track density measured in the mica detector; pd=induced track density of the standard glass dosimeter CN 1 measured in the external detector; Ns, Ni and Nd = number of tracks counted in determining ps, pi and pd, respectively; n=number of crystals dated; γ =correlation coefficient between individual track counts; P(χ^2)=probability of obtaining observed χ^2 value for v degrees of freedom, where $v=n-1$ (Galbraith, 1981); (ps/pi)=mean ratio of ps to pi for sample showing unacceptable [P(χ^2)<5%].

Table 5. K-Ar ages of the granitic rocks around the Jecheon area (Shibata *et al.*, 1983)

Sample No.	Sheet name	Nat'l Grid (x/y)	Rock type	Mineral	K ₂ O (%)	⁴⁰ Ar _{rad} (10^{-6} mol/g)	⁴⁰ Ar _{rad} (%)	Age (Ma)
G-1	Jecheon	129.2/398.2	Hb-Bi Gd	Biotite	6.86	41.6	92.4	179 \pm 6
G-2	Yeongwol	135.0/412.0	Bi Gr	Biotite	8.31	47.4	93.5	169 \pm 5
G-3	Jecheon	129.2/397.8	Aplite	Biotite	3.56	19.1	86.8	159 \pm 5

Gd=granodiorite; Gr=granite; Hb=hornblende; Bi=biotite.

Table 6. Retention temperatures for whole-rock and minerals in isotopic geochronology (Dodson, 1973; Wagner *et al.*, 1977; Nishimura and Mogi, 1986). (in °C)

Materials	Rb-Sr	K-Ar	Fission-track
Whole rock	720 \pm 100	500 \pm 100	
Hornblende		500 \pm 75	
Muscovite	500 \pm 50	350 \pm 50	
Orthoclase	360 \pm 40	150 \pm 30	
Microcline	340 \pm 40	150 \pm 30	
Biotite	310 \pm 40	270 \pm 40	
Plagioclase		260	
Sphene			290 \pm 40
Zircon			200 \pm 30
Apatite			110 \pm 15

기에 대한 언급은 1:1,000,000 韓國地質圖 (국립지질조사소, 1956)에서 白堊紀라고 한 것이 최초였으며, 그후 1:50,000 堤川地質圖 (金基琬 외, 1967), 1:250,000 春川地質圖 (국립지질광물연구원, 1973), 그리고 개정·보완된 1:1,000,000 대한지질도 (한

국동력자원연구소, 1981)에서도 이의 관입시기를 白堊紀로 표기하여 왔었다. 그러나 최근 이 암체에서 採取한 시료로 분리한 흑운모의 K-Ar연령 (Shibata *et al.*, 1983)은 각각 179 \pm 6 Ma (서남부 암체), 169 \pm 5 Ma (동북부 암체) 및 159 \pm 5 Ma (南部の 半花崗岩質岩)로 보고된 바 있다 (표 5).

그러나 K-Ar 흑운모연령은 그것이 지시하는 年齡保存溫度가 비교적 낮아서 (표 6) 貫入年齡을 提示하지는 못한다. 따라서 이 岩體의 貫入時期는 적어도 흑운모의 연령보다 더 오래인 侏羅紀 初期일 것으로 추정할 수 있다.

Rb-Sr 全岩-鑛物 아이소크론 연령에 의하여 堤川 화강암체의 貫入時期가 203 \pm 2 Ma인 것이 이번 연구에서 처음으로 확인되었지만, 사실은 이 연령도 그림 3에서 알 수 있듯이 전암시료들의 Rb과 Sr의 同位元素 比만으로 얻어진 것이 아니라 세계의 전 암석 및 7개의 주구성광물 (사장석, 미사장석과 흑운모)의 Rb과 Sr의 同位元素 比로 결정된 것이고, 특히 이 연령에 큰 영향을 미친 광물은 세계의 흑운모 시료이므로 이 암체가 용융체로 있을 때부터의

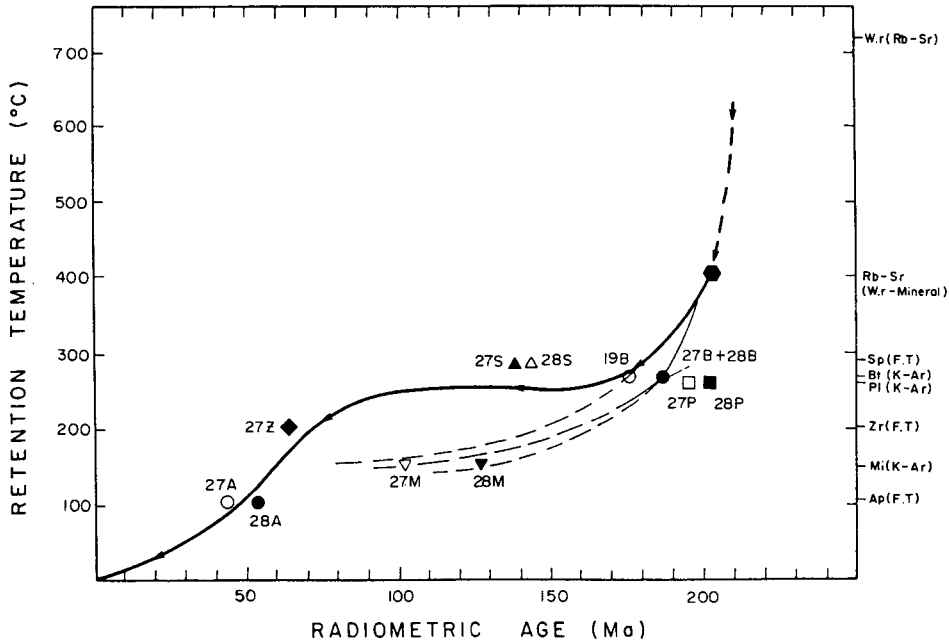


Fig. 4. Thermal histories for the Jecheon granites in the Ogcheon Fold Belt.

연령이라고 하기보다는 Rb-Sr 흑운모 연령 (표 6)과 같거나 그 보다 조금 더 높은 온도 ($300 \pm 50^\circ\text{C}$)부터의 연령이라고 해석하는 것이 더 타당하리라고 생각된다.

또 初生 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比 (0.7140)는 맨틀起源 岩石의 基準 初生值 (<0.708) 보다 훨씬 높은 값을 보여줌으로써, 이 岩體를 만든 火成岩질 마그마는 下部地殼 (lower crust) 또는 堆積起源의 岩石이 部分熔融을 받아 만들어진 S-型이거나 맨틀起源의 마그마와 地殼物質의 심한 混和作用으로 만들어진 마그마로부터 結晶·分化한 것으로 해석된다.

K-Ar 연령은 사장석 (206~187 Ma)→흑운모 (187~177 Ma)→미사장석 (127~103 Ma) 順이고, 燧石트랙 연령은 스피넬 (143~139 Ma)→저콘 (64 Ma)→인회석 (54~44 Ma) 順으로 짧게 나타났다. 이것은 대체로 해당광물의 年齡保存溫度 (표 6)의 순서에 따른 이 암체의 冷却史 (cooling history)를 제시하고 있음을 의미한다.

Rb-Sr연령과 K-Ar 광물연령만으로 제천화강암체의 냉각사를, J-27과 J-28 시료를 이 암체의 대표시료라 하고 고찰하면 (그림 4에서 切線으로 표시된 것), 이 암체는 적어도 쥬라기 초기 (~203 Ma)보다는 조금 더 오래 전에 관입한 후, 초기에는 적어도

약 $20^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 의 냉각속도 보다는 더 큰 속도로 약 300°C 까지 급격히 냉각되었으며, 쥬라기 중기~백악기 초기 (190~125 Ma) 중에는 매우 서서히 냉각하면서 (약 $2^\circ\text{C}/\text{Ma}$) 지하 약 3 km까지 상승하였다고 해석할 수 있으나, J-19의 자료는 이 보다는 조금 더 서서히 냉각한 것으로 나타났다 (그림 4에서 절선으로 냉각과정을 표시한 것). 이것은 이 지역이 심한 변질작용으로 흑운모내의 同位元素 閉鎖系가 파괴되어 알곤損失이 일어난 때문이라는 것이 야외 조사에서 확인되었다.

또 비슷한 위치의 두개 시료 (JC-27과 JC-28)의 흑운모연령은 서로 잘 일치하나 (187 Ma), 이와 약간 떨어진 제천시 부근의 JC-19 시료 (176.5 ± 2.5 Ma)와 제천시의 남쪽지역 금성광산 입구에서 採取한 시료 (Shibata *et al.*의 시료 G-1)는 오차의 범위를 고려하더라도 약간 낮은 편 (179 ± 6 Ma)인데, 이러한 사실은 이 두 시료 (JC-19과 G-1)를 採取한 地域이 대가 완전히 고결된 후에 흑운모의 K-Ar 연령보존 온도 ($270 \pm 40^\circ\text{C}$) 보다 낮은 온도의 또 다른 後期的 熱 또는 熱水의 影響을 받아 흑운모내의 Ar이 부분적으로 損失 되었음을 암시한다.

그러나 표 6에서 볼 수 있듯이 K-Ar 사장석과 흑운모의 연령보존온도가 각각 260°C 와 $270 \pm 40^\circ\text{C}$

이고, F.T. 스펀의 연령보존온도가 $290 \pm 40^\circ\text{C}$ 임에도 불구하고 K-Ar 사장석의 연령이 흑운모의 연령보다 약 10 Ma가 더 오래된 것으로 나타나고, 스펀의 연령이 약 40 Ma K-Ar 흑운모 연령보다 더 젊은 것으로 나타났다. 또 K-Ar 미사장석 연령보존온도 ($150 \pm 30^\circ\text{C}$)가 F.T. 저콘의 연령보존온도 ($200 \pm 30^\circ\text{C}$)보다 낮지만 오히려 미사장석의 연령이 약 50 Ma 더 오래된 것으로 나타났다. 이런 결과는 연령보존온도가 아직까지 정확히 확립되지 못했다는 것을 암시하며, 각각의 연령을 연령보존온도에 점사하여 이 암체의 냉각사를 간단히 해석한다는 것이 쉽지 않음을 알 수 있다. 이와 같은 사실은 각각의 연령보존온도의 主規制要因 (main controlling factor)이 서로 다르기 때문에, 같은 방법으로 구한 각 광물별 연령은 그 광물의 보존온도에 상응하는 연령을 제시하지만, 각각 다른 방법으로 측정된 동위원소연령을 비교할 때에 그 연령은 각각의 연령보존온도에 상응하지 않을 수도 있음을 제시하고 있다. 특히 Rb-Sr 및 K-Ar법은 對象암석 또는 광물 그리고 모원소 (parent elements)와 딸생성물 (daughter products)의 물리화학적 성질에 따라 對象물질내에서 지질시대를 거쳐오는 동안에 후차적으로 열 (온도), 열수, 압력 등의 영향을 받으면 대상물질이 폐쇄체로 있다가 개방체로 되는 경우가 많아서 정확한 연령을 보여주지 않을 수도 있음은 잘 알려진 사실이다. 그러나 횡선트랙법은 壓力이나 熱水 등에는 별로 영향을 받지 않으며 오직 열에만 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

그러므로 제천화강암체가 관입·정지된 후, 초기냉각기 (흑운모의 연령보존온도까지)를 거칠때까지는 그 자리에 위치하고 있다가 그후부터 상승하였다고 가정하고 Rb-Sr 전암연령, K-Ar 광물연령 및 F.T. 광물연령과 연령보존온도를 x 및 y축으로 하여 점사·종합하여 제천화강암체의 전체적인 열역사를 밝혔으며, 주로 300°C 이하에서는 횡선트랙 광물연령을 爲主로 冷却過程 (cooling path)을 다음과 같이 해석했다 (그림 4).

이 암체는 쥬라기 초기 (~203 Ma)에 지하심부 (katazone 또는 mesozone; 7~9 km의 地下; Buddington, 1957)에 관입하여 晶出하면서 약 300°C 까지는 주위 모암과의 溫度差로 급격한 초기냉각 ($20^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 이상)을 거쳐, 쥬라기 중기-백악기 초기 (190~140 Ma) 중에는 두꺼운 상부지층 (overburden)의 荷重에 의하여 오랜 기간동안 周圍의 母岩과

熱的 平衡을 維持하여 냉각이 거의 停止되어 있었다. 그후 백악기 초기~말기 (약 140~70 Ma)까지는 韓半島 地殼내의 火成活動에 따른 활발한 地體構造運動과 암석의 빠른 침식에 의한 荷重의 감소로 이 암체가 3~4 km 용기 및 상승하였으며 (평균 40 m/Ma), 온도차는 약 300°C 부터 200°C 까지로서 평균 $1.4^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 로 냉각되었다. 백악기 말기~제3기초 (70~50 Ma)에는 韓半島 지각내의 더욱 활발한 火成活動 및 지체구조운동에 따른 지표의 활발한 침식작용으로 인한 地殼荷重의 감소로 인회석의 연령보존온도인 약 100°C 까지 약 120 m/Ma의 상승률과 약 $5^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 의 냉각률을 가지고 2~3 km 급속히 상승하였으며, 제3기 이후 현재까지는 제삼기의 지체구조운동 등에 의해 평균 60 m/Ma의 상승속도와 $2^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 의 냉각속도로 약 2~3 km 상승·진화된 것으로 해석된다 (그림 4에서 실선으로 냉각과정을 표시한 것).

結 論

堤川 화강암체의 관입시기는 Rb-Sr 全岩-鑛物 아이소크론 연령 (약 203 ± 2 Ma)에 근거하면 쥬라기 初로 확인되었으며, 그 初生 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比 (0.7140)는 이 암체가 下部 地殼 또는 퇴적암 起源의 암석이 部分熔融을 받아 만들어진 S-型의 花崗岩質 마그마로부터 結晶, 分化된 花崗岩으로 해석된다.

또 이 암체의 마그마는 쥬라기 초기에 地下深部 (katazone 또는 mesozone; 7~9 km 지하)로 관입·晶出하면서 약 300°C 까지는 주위 모암과의 溫度差로 급격한 初期冷却 ($20^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 이상)과정을 거쳐, 쥬라기 중기-백악기 초기 (190~140 Ma) 중에는 두꺼운 上部地層 (overburden)의 荷重에 의하여 오랜 기간 동안 주위의 모암과 熱的 平衡을 유지하여 冷却이 거의 停止되어 있었다. 그후 백악기 초기~말기 (약 140~70 Ma)까지는 한반도 地殼의 火成活動에 따른 地體構造運動과 암석의 활발한 浸蝕에 의한 荷重의 감소로 이 암체가 3~4 km 용기 및 상승하였으며 (평균 40 m/Ma), 온도는 약 300°C 부터 200°C 까지로서 평균 $1.4^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 로 냉각되었다. 백악기 말기~제3기초 (70~50 Ma)에는 인회석의 연령보존온도인 약 100°C 까지 120 m/Ma로 지각이 급속히 상승하면서 약 $5^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 로 냉각되었으며, 제3기 이후~현재까지는 제삼기의 지체구조운동 등에 의해 평균 60 m/Ma의 上昇速度와 $2^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 의 냉각속도로 약 2~3 km

上昇·進化된 것으로 해석된다.

謝 言

이 연구는 動力資源部 鑛山課 出捐研究課題 (89-1623, 90-1642)의 연구비로 수행되었기에 적극적으로 지원해준 關係機關에 감사드리며, 이 논문의 원고를 세심하게 검토하여 더욱 좋은 논문이 되도록 협조해 준 권성택 교수와 박계현 (표준연구원 기초과학연구지원센터), 민경원 (강원대) 그리고 좌용주 (경상대) 박사들께 심심한 감사를 드리며, 이원고를 작성할 때 전산처리에 협조해준 한국자원연구소 지하화학연구그룹의 이진수박사께도 깊은 감사를 드립니다.

參考文獻

- 國立 地質調查所, 1956, 韓國地質圖 (1 : 1,000,000).
 國立 地質鑛物研究所, 1973, 春川地質圖 (1 : 250,000).
 金奎漢, 慎胤修, 1990, 忠州-月岳山-堤川 花崗岩類의 岩石化學的 研究.
 金基院, 朴奉淳, 李泓圭, 1967, 韓國地質圖 (1 : 50,000), 堤川圖幅 및 說明書, 國立地質調查所.
 金玉準, 1971, 南韓의 新期花崗岩類의 貫入時期와 地殼變動. 鑛山地質 4, 1-9.
 金星載, 1987, K-Ar法에 의한 岩石·鑛物의 年代測定. KR-86-2-17, 29-98, 韓國動力資源研究所.
 金勇俊, 1979, 堤川 花崗岩體에 대한 岩石學的 연구. 鑛山地質 12, 115-126.
 徐海吉, 朱昇煥, 1971, 韓半島의 花崗岩類 貫入時期. 地質·鑛床 14, 31-44, 國立地質調查所.
 朱昇煥, 1983, Rb-Sr法에 의한 韓半島 京畿陸塊의 年代測定에 관한 研究. 漢陽大學校 博士學位 論文.
 朱昇煥, 池世定, 1990, 平昌-閔慶 一圓에 분포하는 花崗岩體의 Rb/Sr 年齡測定研究. 同位元素地質研究 KR-89-1C, 韓國動力資源研究所, 5-61.

- 陳明植, 辛性天, 1987, 隕선트랙法에 의한 年代測定 및 標準實驗. KR-86-2-17, 99-136, 韓國動力資源研究所.
 韓國動力資源研究所, 1981, 大韓地質圖 (1 : 1,000,000).
 Buddington, A.F., 1959, Granite Emplacement with Special Reference to North America. Geol. Soc. Am. Bull., 70, 671-747.
 Dodson, M.H., 1973, Closure Temperature in Cooling Geochronological and Petrological System. Cont. Mineral. Petrol., 40, 259-274.
 Galbraith, R.F., 1981, On statistical models for fission track counts. Math. Geol. 13, 471-478.
 Nishimura, S. and Mogi, T., 1986, The Interpretation of Discordant Ages of Some Granitic Bodies. Jour. Geotherm. Res. Soc. Japan. 8, 145-164.
 Shibata, K., Park, N.Y., Uchiumi, S. and Ishihara, S., 1983, K-Ar ages of the Jecheon granitic complex and related molybdenite deposits in South Korea. Mining Geol. 33, 193-197.
 Shin, S.C., 1987, Etching Characteristics of fission tracks in minerals, and fission track dating and calibration of zircon; J. Geol. Soc. Korea, 23, 11-34.
 Shin, S.C. and Nishimura, S., 1991, Direct comparison of zeta calibration constants for fission-track dating by double-checking of two irradiation facilities with different degrees of neutron flux thermalization. Chemical Geol. (Isotope Geosci. Sec.) 87, 147-166.
 Steiger R.H. and Jager, E., 1977, Subcommission on geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. Earth Planet. Sci. Lett., 36, 359-362.
 Wagner, G.A., Reimer, G.M. and Jager, E., 1977, cooling ages derived by apatite fission track, mica Rb-Sr and K-Ar dating: the uplift and cooling history of the Central Alps. Mem. Deg. Inst. Geol. Min. Univ. Padova, 30, 1-27.
 Wendt, I, 1976, Methods of statistical evolutions in geochronology. Proc. Sem. Isotope Dating. CCOP/TP. 3, 20-27, May 1975, Bangkok, Thailand.

(책임편집 : 박계현)

Thermal history of the Jecheon granite pluton in the Ogcheon Fold Belt, South Korea

Myung-Shik Jin, Seong-Jae Kim, Seong-Cheon Shin,
Seung-Hwan Choo and Se-Jung Chi

*Korea Institute of Geology, Mining and Materials (KIGAM) 30, Kajung-dong,
Yusong-ku, Taejon, Korea. 305-350*

ABSTRACT : Whole rock and mineral ages for the Jecheon Granite distributed in the Ogcheon Fold Belt were dated by three radiometric methods, and its thermal history was elucidated as follows, on the basis of isotopic age data. Rb and Sr isotopic compositions of three whole rock and seven mineral concentrates made an isochron of 202.7 ± 1.9 Ma with a strontium initial ratio of 0.7140. Different age data of twelve mineral concentrates agree closely with the retention temperature of each mineral in K-Ar and Fission Track methods. The Jecheon granitic magma was generated by partial melting of crustal materials (S-type), or by mixins between mantle and crustal materials, intruded into the katazone or mesozone (7~9 km) of the Ogcheon Fold Belt, at least in the Early Jurassic (about 203 Ma), and then crystallized and cooled down rapidly from about 600°C to 300°C (more than 20°C/Ma), owing to thermal differences between the magma and the wall-rock. During the Middle to Late Jurassic (190~140 Ma), the cooling of the granite was likely to stop and keep thermal equilibrium with the wall-rock. The severe tectonism associated with igneous activities and active weathering on the surface in Early to Late Cretaceous time (140~70 Ma) might have accelerated the granite pluton to uplift rapidly (40~60 m/Ma in average) up to 3~4 km and cooled down from 300°C to 200°C (1.4°C/Ma). The granite pluton was likely to keep different uplifting and cooling rate of about 120 m/Ma and 5°C/Ma in average from the Late Cretaceous to Early Tertiary (70~50 Ma), and about 60 m/Ma and 2°C/Ma in average from about 50 Ma up to the present, respectively.

Key Words : Ogcheon Fold Belt, thermal history, Jecheon granite, isotopic ages, retention temperature